

УДК 550.34

Омуралиева А., Омуралиев М.
Институт сейсмологии НАН КР,
г. Бишкек, Кыргызстан

ДИНАМИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СОПРЯЖЕНИИ ОБЛАСТЕЙ ГОРООБРАЗОВАНИЯ ПАМИРА И ТЯНЬ-ШАНЯ: ЗААЛАЙСКОГО ПОДНЯТИЯ И АЛАЙСКОЙ ВПАДИНЫ

Аннотация. В статье приводится динамика сейсмических процессов на сочленении областей горообразования Памира и Тянь-Шаня.

Ключевые слова: область горообразования, землетрясение, область концентрации землетрясений, динамическая сегментация и секторизация активных структур, повторяемость землетрясений, последовательность проявления землетрясений, периоды сейсмической активизации и затишья, кумулятивная сейсмическая энергия, вектор сейсмической активизации.

ПАМИР ЖАНА ТЯНЬ-ШАНЬ ТОО ПАЙДА БОЛУУ ТАРМАКТАРЫНЫН: ЗААЛАЙ КӨТӨРҮЛҮҮСҮ ЖАНА АЛАЙ ОЙДУҢУНУН КОШУЛГАН ЖЕРИНДЕГИ СЕЙСМИКАЛЫК ПРОЦЕССТЕР ДИНАМИКАСЫ

Кыскача мазмуну. Макалада Памир жана Тянь-Шань тоо пайда болуу тармактарынын кошулган жериндеги сейсмикалык процесстердин динамикасы келтирилген.

Негизги сөздөр: тоо пайда болуу тармагы, жер титирөө, жер титирөөлөрдүн топтолгон тармагы, активдүү структуралардын динамикалык сегментациясы жана секторизациясы, жер титирөөлөрдүн кайталанышы, жер титирөөлөрдүн болушунун ырааттуулугу, сейсмикалык активизация жана басандоо периоддору, топтолгон (кошулмаланган) сейсмикалык энергия, сейсмикалык активдештирүүнүн вектору.

DYNAMICS OF SEISMIC PROCESSES AT THE JUNCTION OF THE PAMIR AND TIEN SHAN MOUNTAIN BUILDING AREAS: THE ZAALAI RANGE AND ALAY BASIN

Abstract. Dynamics of seismic processes at the junction of the Pamir and Tien Shan orogenesis area is presented in the paper.

Keywords: orogenesis area, earthquake, earthquake concentration area, dynamic segmentation and sectorization of active structures, earthquake recurrence, sequence of earthquake manifestations, seismically active and calm periods, cumulative seismic energy, and vector of seismic activation.

Области горообразования Памир (на юге) и Тянь-Шань (на севере) формируются на сочленении Евразийской и Индийской литосферных плит [1], [2], [3], [4]. Памир находится севернее горных систем Гиндикуш и Гималаи в зоне субдукции, где литосфера Индийской плиты поддвигается под литосферу Евразийской плиты.

На основе интерпретации сейсмологических материалов по трансконтинентальному профилю Нанга-Парбат-Токтогул и дополнения данных по взрывам и землетрясениям составлен обобщённый разрез [5] (рис.1). На этом разрезе под Северным Памиром и Алайской впадиной скорость продольной волны составляет

4.5-5.5 км/с до глубины 10 км; 5.5-5.9 км/с на глубинах 10-15 км; 6.4-6.7 км/с на глубинах 25-30 км; 6.0-6.3 км/с на глубинах 30-50 км и 6.9-7.2 км/с на глубинах 50-75 км. Соответственно, на глубинах 20-25 км и 30-50 км наблюдаются относительно пониженные значения скорости, т.е. выделяются волноводы. Особенности скоростных неоднородностей и их границ в данном разрезе позволяют отметить, что высокоскоростные неоднородности в нижней части земной коры и верхней мантии Памира расслоены, вследствие развития пологозалегающих ярусных (этажных) разломов с южными азимутами падения.

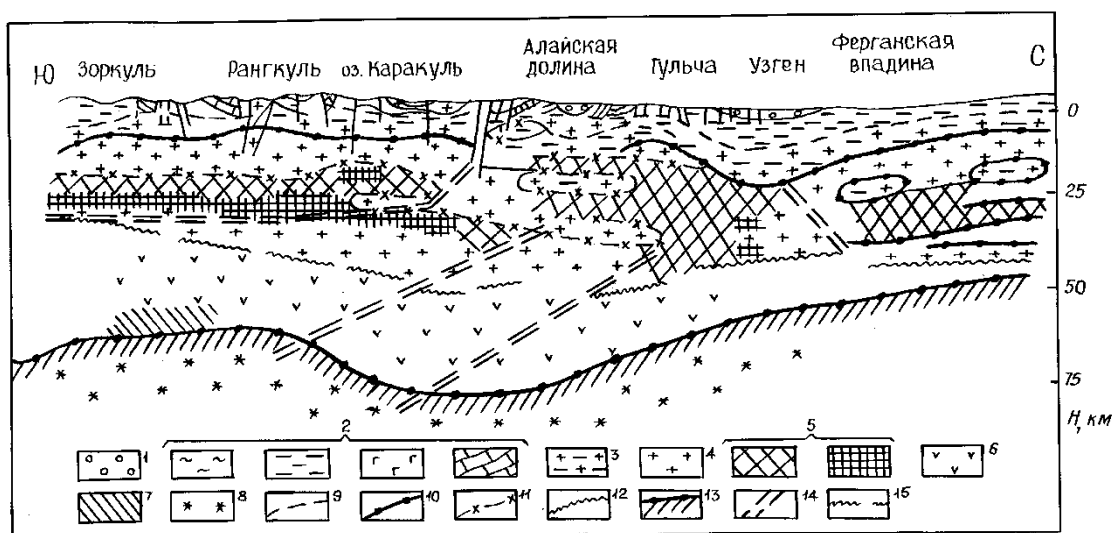


Рис.1. Вертикальный скоростной разрез земной коры по профилю Токтогул – Узген – Каракуль – Зоркуль [5]. 1- неметаморфизованные осадки мезозоя – кайнозоя; 2- осадочно-метаморфизованные теригенные и вулканогенные породы палеозоя, мезозоя-кайнозоя и верхнего докембрия ($V_p=4.0-4.9$; $5.0-5.4$ и $4.5-5.0$ км/с); карбонатные породы (известняки, доломиты, мраморы, $V_p=4.5-7.0$ км/с); 3- гранито-гнейсы, кристаллические сланцы, $V_p=5.5-5.9$ км/с; 4-гранитоидные массивы и близкие к ним по свойствам породы (V_p вблизи поверхности $4.5-5.5$, на глубине $6.0-6.3$ км/с); 5-диоритовые гнейсы, амфиболиты, $V_p=6.4-6.7$; у поверхности $5.0-5.2$ км/с; 6-амфиболиты, гранулиты, доломитовые мраморы, эклогитизированные породы (условно «базальтовый» или «гранулитобазитовый» слой), $V_p=6.9-7.2$ км/с; 7- эклогитизированные породы («кормантийная» смесь), $V_p=7.4-7.6$ км/с; 8- периодиты, пикриты, эклогиты; 9-12 – изоповерхности: 9- $V_p=5.5-5.9$ км/с – кровля «гранито-гнейсов», 10- $V_p=6.0-6.3$ км/с – «гранитного слоя», 11- $V_p=6.5-6.7$ км/с – кровля «диоритового» слоя, 12- $V_p=6.9-7.2$ км/с – кровля «гранулитобазитового» слоя, или граница Конрада; 13- граница М; 14- разломы различного характера, найденные по особенностям строения коры или известные по геологическим данным; 15- неуверенные участки границ.

Региональная модель Памира, Тянь-Шаня и Туранской плиты [6] приведена на рис.2а. На сопряжении Памира и Тянь-Шаня проявляется зона континентальной «субдукции». Участок литосферы в районе Гиндикуша резко погружается в астеносферу. Землетрясения в пределах Гиндикуша – глубокофокусные до глубины 250 км (рис.2б) [7].

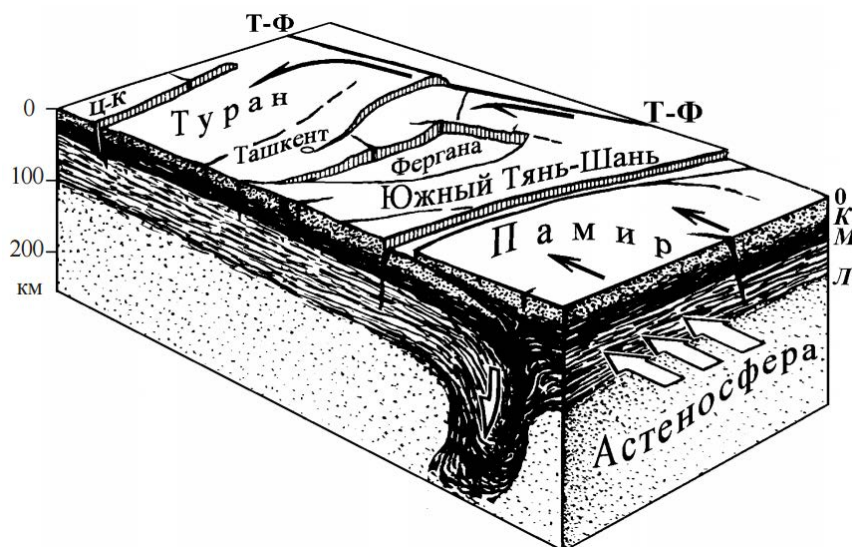


Рис.2а. Модель сопряжения Памира, Тянь-Шаня и Туранской плиты [6].

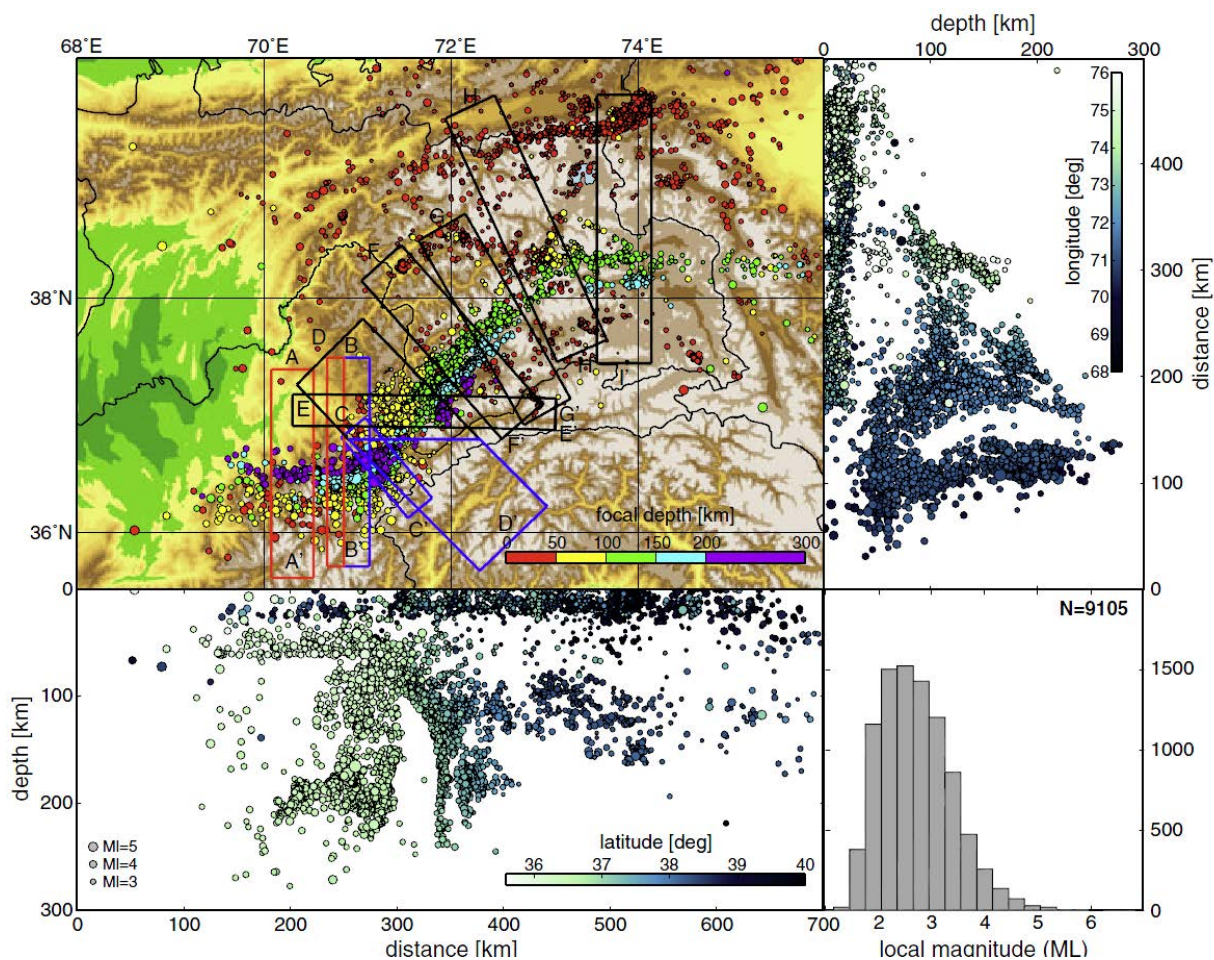


Рис.2б. Общее распределение сейсмичности в районе исследования с августа 2008 года по июнь 2010 года в виде карты (нанесено на топографическую карту) и как проекция всех событий на продольную и широтную плоскости. Размеры точек обозначают разные магнитуды землетрясений, а цвета обозначают разные уровни глубины и расстояние от плоскости проекции, соответственно, как указано в цветовых легендах. Цвета отражают подразделение в западном Гиндукуше (красный), восточном Гиндикуше (синий) и Памире (чёрный). Нижняя правая часть показывает распределение локальных магнитуд (M_L) в

наборе данных. Здесь показано 9105 от общего числа 9532 землетрясений; недостающие события расположены к северу от региона, показанного на этом участке [7].

На основании палеомагнитных данных [2], результатов реконструкции фации бассейнов отмечено, что Памир изогнут, сокращён и перемещён в северном направлении на расстоянии порядка 300 км. В то время южная часть Памира перемещена относительно Евразии на расстоянии порядка 600 км. Большая величина сокращения земной коры приурочена к наиболее высокоподнятым частям, например, Заалайскому хребту. Скорость современного движения по геодезическим измерениям составляет 10-20 мм/год [8], [9].

Памир надвигается на Тянь-Шань и подминает под себя Алайскую впадину. Алайская впадина является частью мезозойско-раннекайнозойской Афгано-Кашгарской впадины, соединяющей Таримский и Таджикский бассейны [3], [4], [10]. На сочленении Северного Памира и Алайской впадины имеются три основных разлома (рисунки 3, 4 а, б, в): Южный, Срединный (T_1) и Северный – Main Pamir Thrust (T_2).

Данные разломы имеют южное падение, взбросовый характер. Последние два разлома является ветвями Южного разлома. Они проявлялись поэтапно, сначала распространилась первая ветка - Срединный разлом (T_1) в сторону Алайской впадины, после проявился Северный – Main Pamir Thrust (T_2) разлом. По поверхности Южного разлома южное крыло, сложенное палеозойскими и ранее мезозойскими породами, надвинуто на северное крыло, сложенное мезозойскими породами. На южном крыле разлома сформировано Заалайское поднятие, где амплитуда поднятия достигла около 7200 м. Срединный разлом имеет сложное строение, с многочисленными ветвями, тектоническими клиньями и пластинами. На крыльях разлома горные массивы сильно деформированы, образованы складчатые структуры. Северный разлом ограничивает предгорную зону. Здесь палеоген – неогеновые отложения южного висячего крыла надвинуты на неогеновые отложения лежащего северного крыла. Соответственно, участки южного крыла Алайской впадины поэтапно вовлекались в поднятие, и формировались предгорные зоны: высокая и низкая.

На основании реконструкции геолого-структурных разрезов определены амплитуды смещения по поверхности активных разломов на меридиане долины р. Алтындара (профиль западный см. рис. 4а), на меридиане пика Ленина (профиль восточный рис.4в) и на центральной части между ними (профиль центральный рис.4б) [10]. Полученные результаты позволяют сказать, что при развитии разломов сокращение участка земной коры в пределах Заалайского поднятия и южного крыла Алайской впадины в меридиональном направлении достигло около 9 км. Вместе с тем происходило сокращение участка земной коры около 2 км в результате формирования складчатых структур.

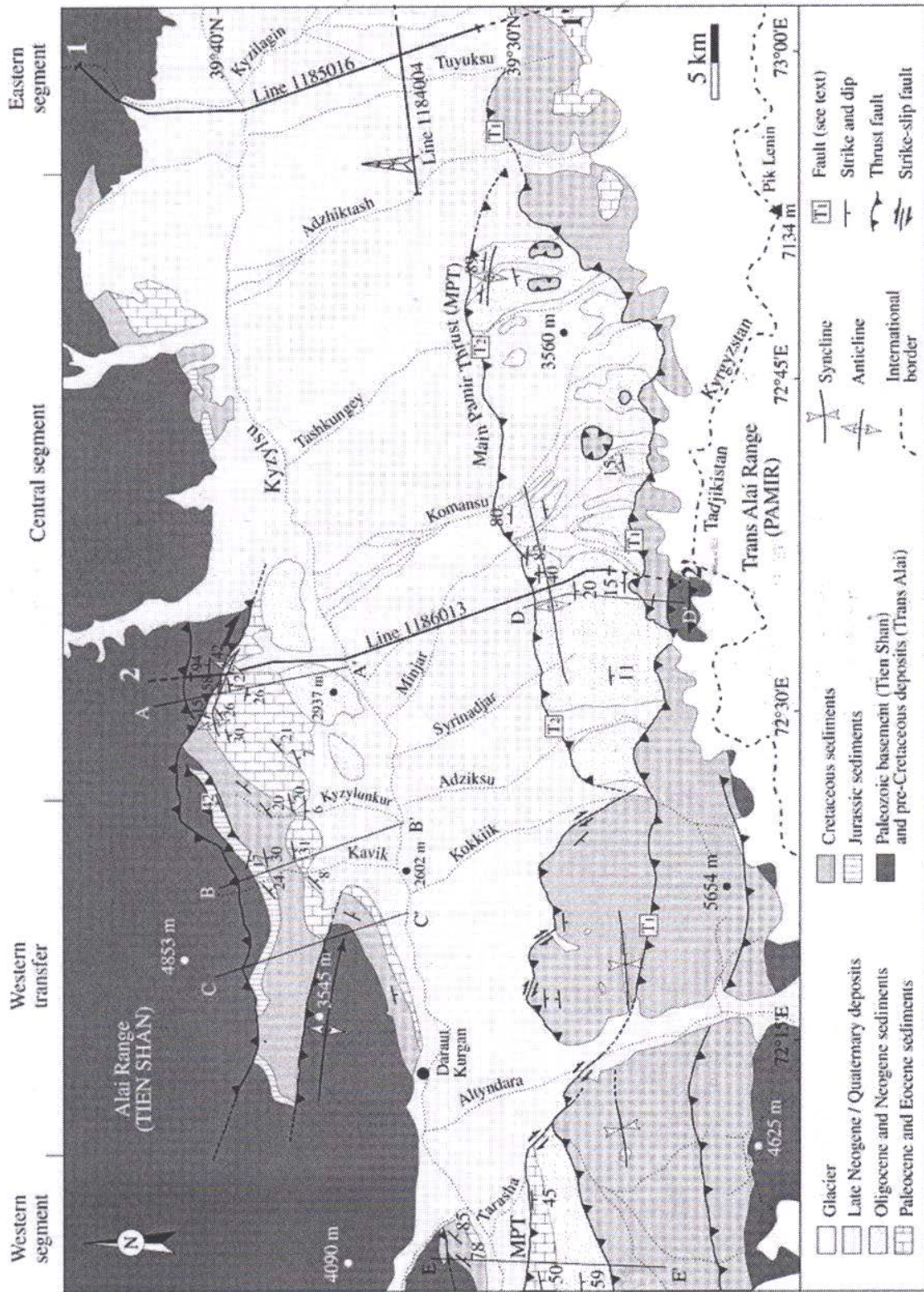


Рис.3. Геолого-структурная схема Алайской впадины и её горных обрамлений [3].

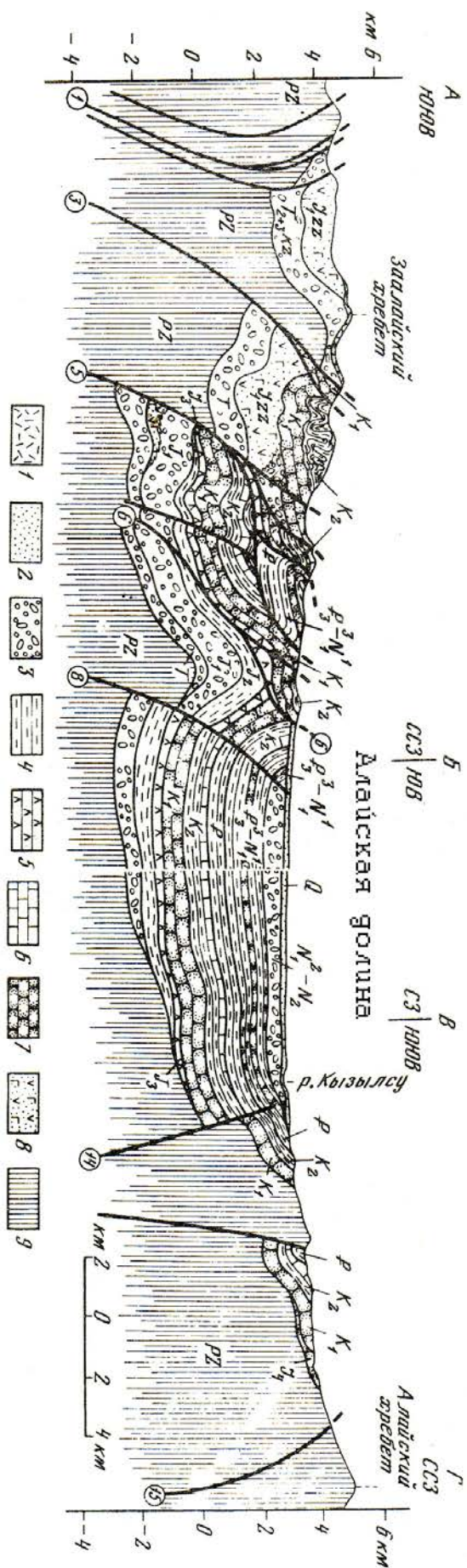


Рис.4 а. Поперечный геолого-структурный разрез Алайской впадины и её горных обрамлений вдоль долины р. Алтындара [10].
 1 - ледники и снежники; 2 - галечники, пески; 3-конгломераты; 4-глины, аргиллиты, глинистые сланцы; 5- гипсоносные
 2- отложения; 6- карбонатные породы; 7- песчаники; 8 - вулканогенные породы; 9 – палеозойское основание.

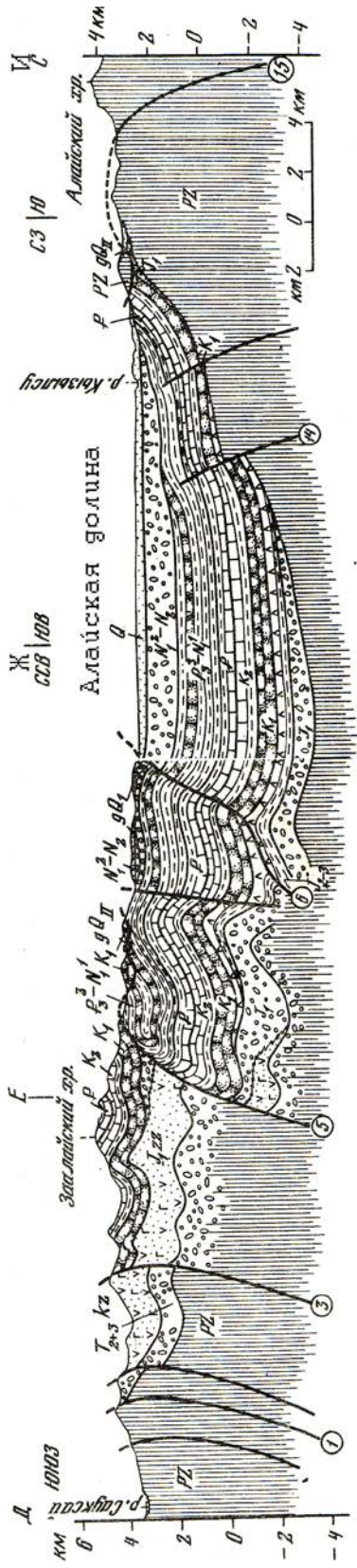


Рис.4 б. Поперечный геолого-структурный разрез Алайской впадины и ее горных обрамлений вдоль долины р. Минжар [10].
Обозначения см. рис.4а.

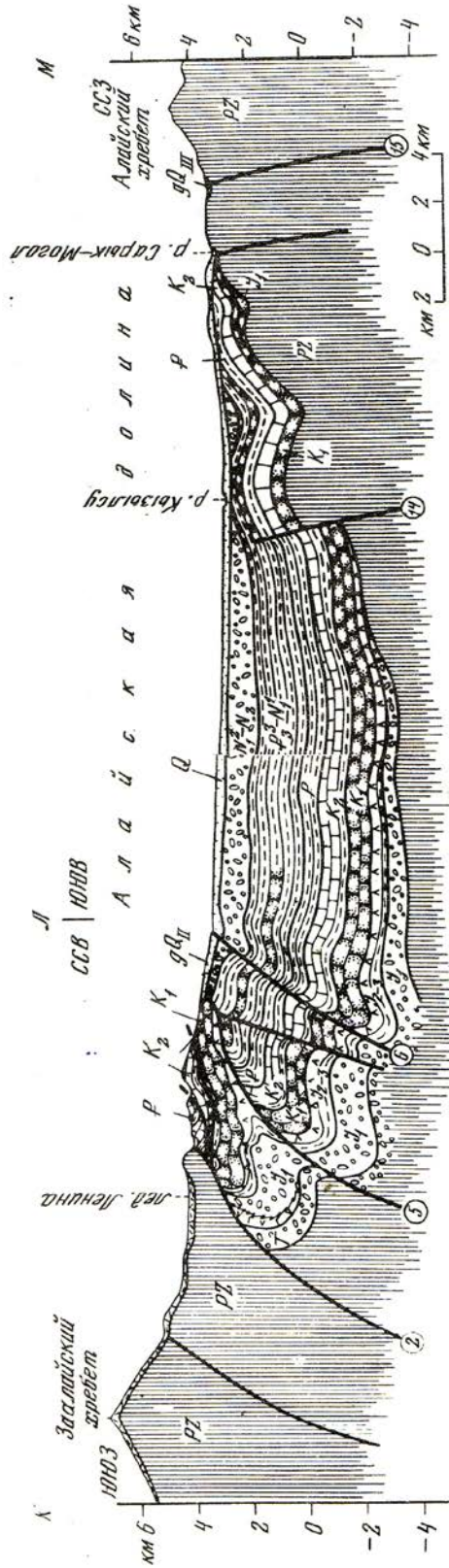


Рис.4 в. Поперечный геолого-структурный разрез Алайской впадины и её горных обрамлений, проходящий через пик Ленина [10].
Обозначения см. рис.4а.

На рисунках 5 (а, б) приведены сейсморазведочные профили, выполненные «Саратовнефтегеофизикой» и результаты интерпретации сейсморазведочных данных на основе материалов глубокой скважины 1П и разрезов отложений по обнажениям [3], [4]. Отмечено расслоение земной коры и формирование системы блоков. Эти блоки надвигались друг на друга. Вместе с тем, часть блоков, где имеются конвергентные движения, выжимались и вдавливались вглубь.

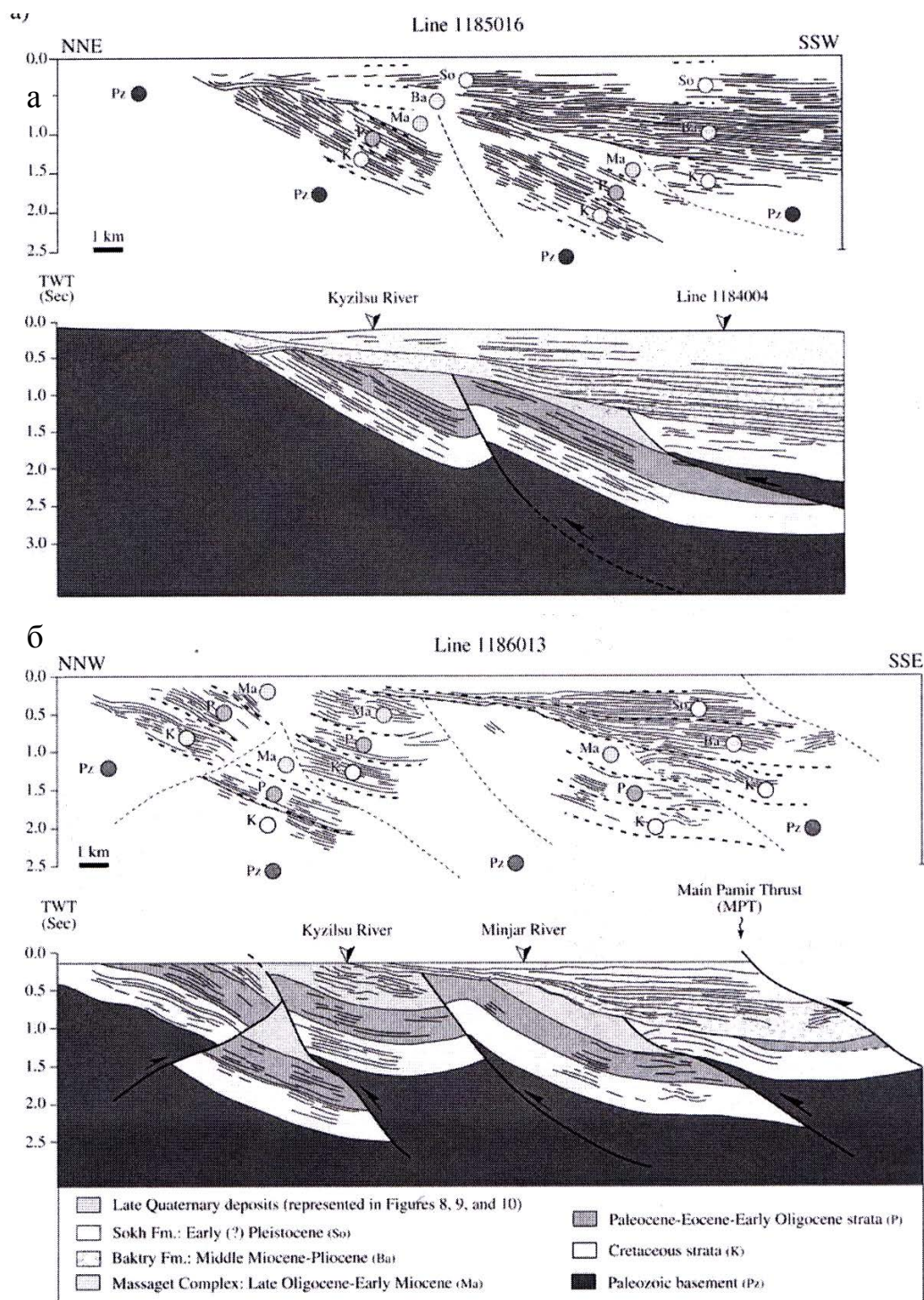


Рис.5. Сейсморазведочные поперечные профили (1186013, 1185016) Алайской впадины и результаты их интерпретации [3]. Вверху – поперечный профиль на восточной части, внизу – поперечный профиль на западной части впадины. Линии профилей показаны на рис.3.

В зонах активных разломов имеются сейсмодислокации сильных палеоземлетрясений. Одна из них находится в долине р. Камансу [4], на левом борту которой обнажается зона разлома (рис.6). Как видно из этого рисунка изменяется угол падения разлома в вертикальном разрезе. Участки с разными углами падения разделены перегибами. Вблизи земной поверхности на висячем крыле основного разлома образовалась ветвь с обратным северным падением. Эти разломы смещают террасу Q_{III} . Во фронтальной части основного разлома образовался уступ. Данная зона вскрыта траншеей, где основной разлом имеет азимут падения $145-150^\circ$, угол падения $20-25^\circ$. Второстепенная плоскость разрыва находится на расстоянии 34 м от основного и имеет обратный азимут падения 350° , угол 45° . Амплитуда поднятия составляет около $A_v=2.5$ м. Амплитуда горизонтальной составляющей $A_g=6.3$ м. Амплитуда смещения по поверхности разлома $U=6.8$ м.

Следует отметить, что эти данные сейсмогенных разрывов отражают основную закономерность распространения крупного разлома от глубины литосферы к земной поверхности, формирования поднятия, его складок на висячем крыле и во фронтальной части распространяющегося разлома.

В левом борту р. Ничкесу величина смещения в плоскости сейсмического разрыва составляет $U = 5.2$ м [10]. В нем горизонтальный компонент - 5 м и вертикальный компонент - 1.5 м. Соответственно, горизонтальный компонент превышает значение вертикального компонента в 3.3 раза. Важно подчеркнуть, что часто не изучаются горизонтальные компоненты смещения по разломам, определяются в основном вертикальные смещения. Примером наибольшего разрыва крупного землетрясения является уступ высотой 13 м в долине р. Сынарджар. Величина смещения достигает $U = 15$ м. Магнитуда землетрясения, вероятно, составляла около $M=8.3$.

Возраст эскарпов (уступов) в пределах Алайской впадины были определены [10], в основном по радиоуглеродному методу (рис.7). На графике распределения возраста сейсмодислокаций Северо-Памирской зоны (рис.8) выделяются своеобразные возрастные уровни: 10000, 7000, 5000, 3000, 2000, 1700, 1000, 500, 300 лет назад. Установлено, что время повторения сильных палеоземлетрясений с раннего периода сокращалось от 3000 лет до 200 лет. Исключением является интервал возрастов 1700-2000 лет, когда проявилось относительно большое количество палеоземлетрясений через 100-150 лет.

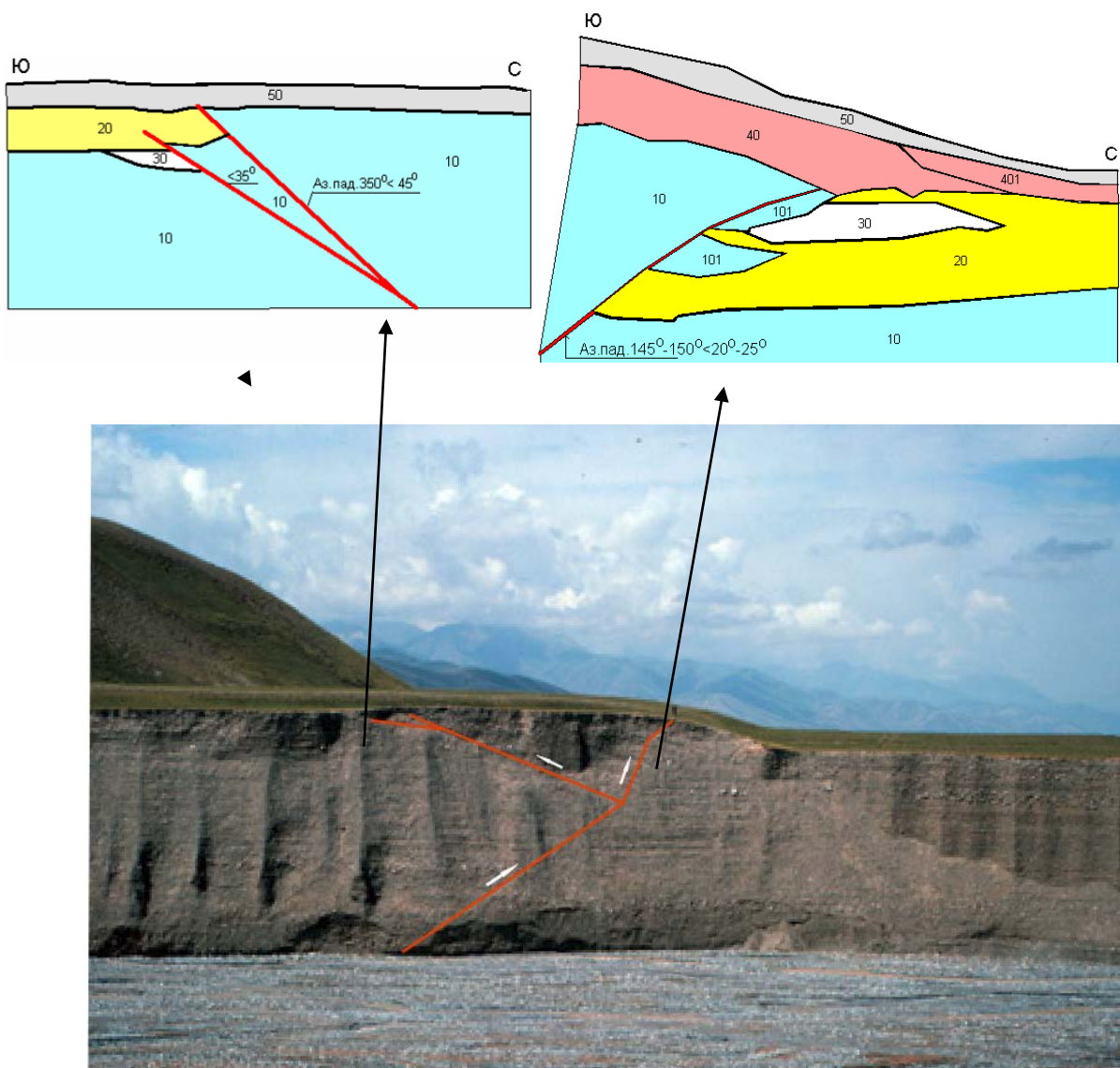


Рис.6. Сейсмогенный разрыв в зоне Главного Памирского (Северного) активного разлома в долине р. Камансу [4]. Внизу - обнажение плоскости разрывов в аллювиальном отложении Q_{III} на западном борту реки. Вверху: фрагменты западной стенки траншеи, пройденной через зону сейсмогенного разрыва

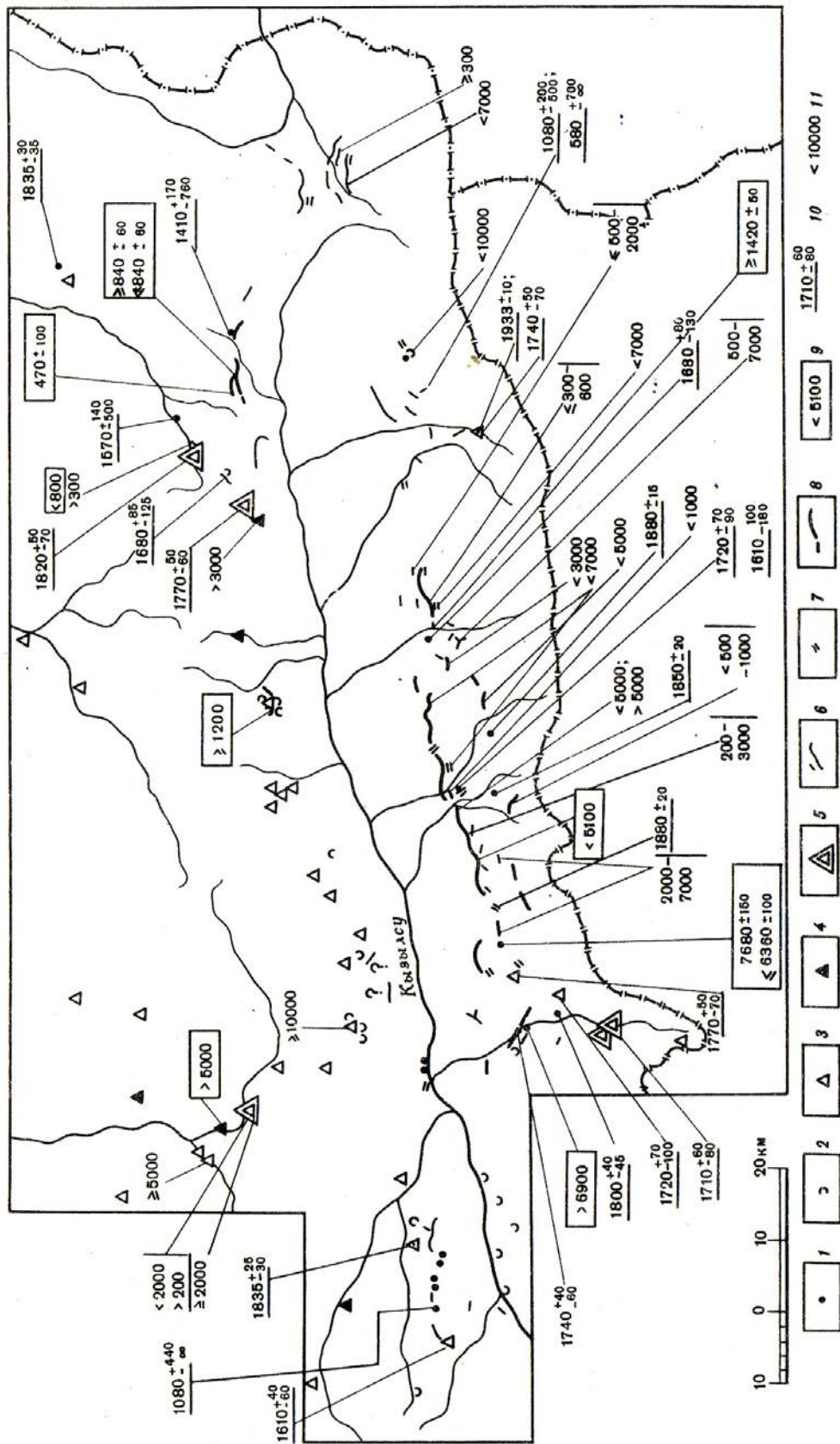


Рис. 7. Карта-схема сейсмодислокаций сильных доисторических (палео-) землетрясений в пределах Алайской впадины [10].
1 - камнепады; 2-срывы и оползни; 3- обвалы мелкие; 4- обвалы крупные; 5- обвалы неоднократные; 6-8 - уступы, рвы, трещины; 6- единичные, 7- групповые, 8 - протяженный уступ; 9-11 - возраст сейсмодислокаций: 9 по данным радиоуглеродного анализа, 10- по лихенометрическим данным; 11 - по геоморфологическим материалам с учетом археологических и радиоуглеродных данных.

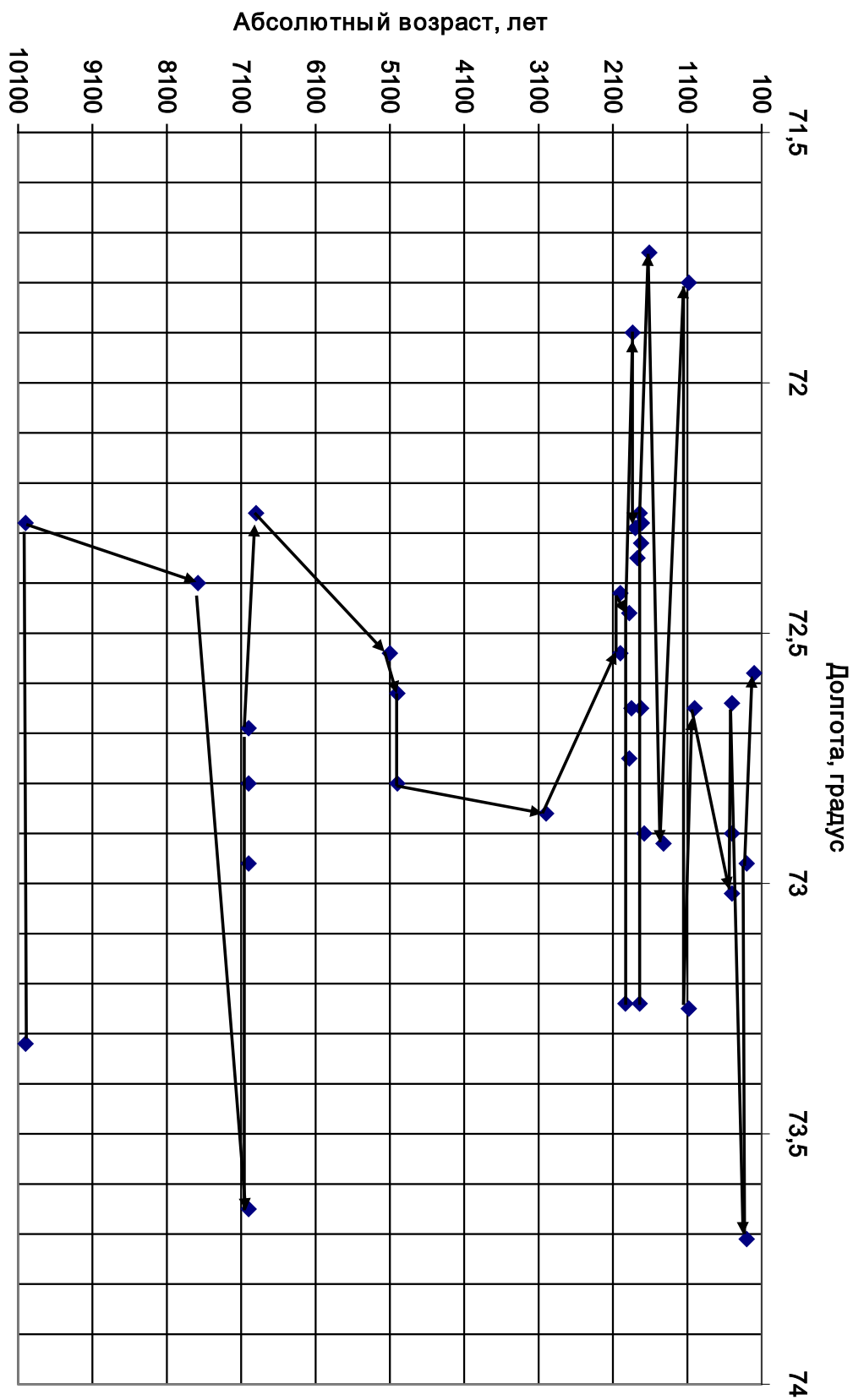


Рис. 8. Распределение возраста сейсмодислокаций сильного палеоземлетрясения Предгалайского сегмента Северо - Памирской сейсмогенерирующей зоны.

На сопряжении Памира и Тянь-Шаня (западнее Таласо-Ферганского разлома) выделяются (с юга на север) структурные зоны: Заалайская (ЗА), Алай-Туркестан-Гиссарская (АТГ), Южно-Ферганская (ЮФ), Северо-Фергана- Курама-Чаткальская (СФКЧ), Чандалаш- Пскем-Угам - Каржанская (ЧПУК) (рис.9).

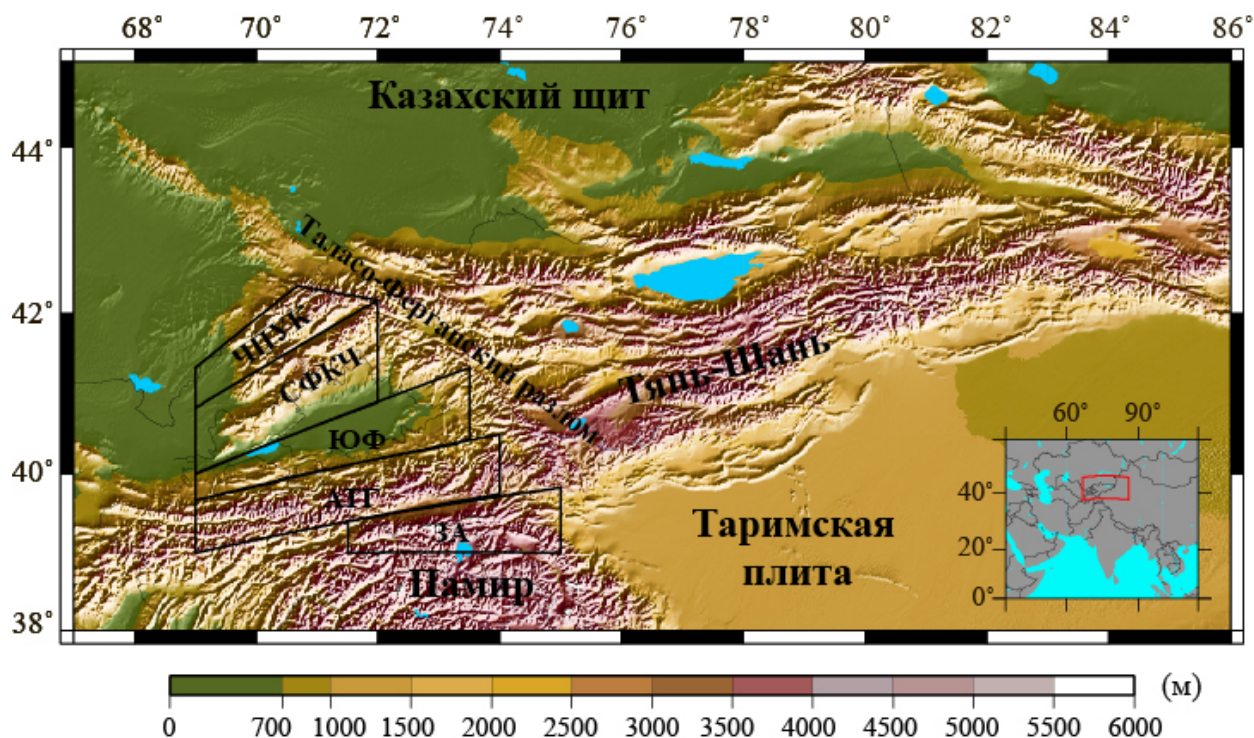


Рис.9. Активные структурные зоны на сопряжении Тянь-Шаня и Памира (с юга на север): Заалайская (ЗА), Алай-Туркестан-Гиссарская (АТГ), Южно-Ферганская (ЮФ), Северо-Фергана- Курама-Чаткальская (СФКЧ), Чандалаш- Пскем-Угам - Каржанская (ЧПУК).

Исходными данными для изучения динамики сейсмических процессов изучаемого региона является каталог землетрясений ИС НАН КР за 1960-2017 гг. в квадрате: $\varphi=39^\circ$, $\lambda=71.5^\circ$; $\varphi=39.33^\circ$, $\lambda=71.5^\circ$; $\varphi=39.83^\circ$, $\lambda=75^\circ$; $\varphi=39^\circ$, $\lambda=75^\circ$.

На рис.10 приведено распределение землетрясений с $11.0 \leq K \leq 16.0$ в пределах активных структур Заалайского поднятия. Значительные землетрясения приурочены к определённым областям, назовем в дальнейшем областями концентрации землетрясений (ОКЗ): Муксу (МС), Саукдара (СД), Маркансу (МР), Кушуюган (КШ).

В распределении землетрясений во времени вдоль активных структур на сочленении Памира и Тянь-Шаня отмечаются векторы сейсмической активизации (рис.11). Векторы активизации направлены с востока на запад и с запада на восток, которые встречаются в пределах области концентрации (ОКЗ МР) Маркансу. Кажущаяся скорость сейсмической активизации вектора с востока на запад составляет около 3 км/год, а с запада на восток – около 4 км/год.

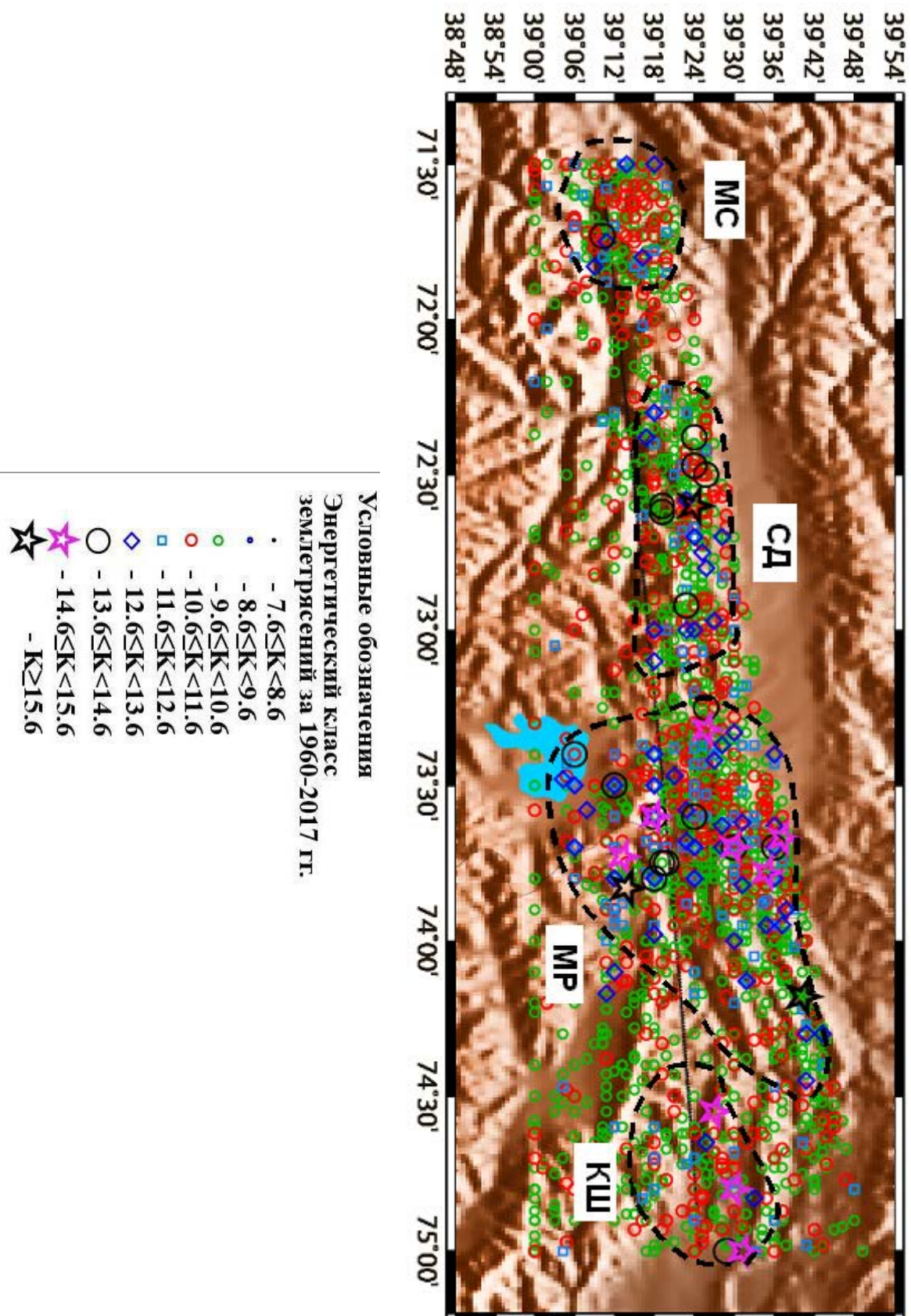


Рис. 10. Пространственное распределение землетрясений $K \geq 7.6$ активных структур Заалая на сопряжении Тянь-Шаня и Памира за 1960-2017 гг. Пунктирными линиями обозначены области концентрации значительных землетрясений

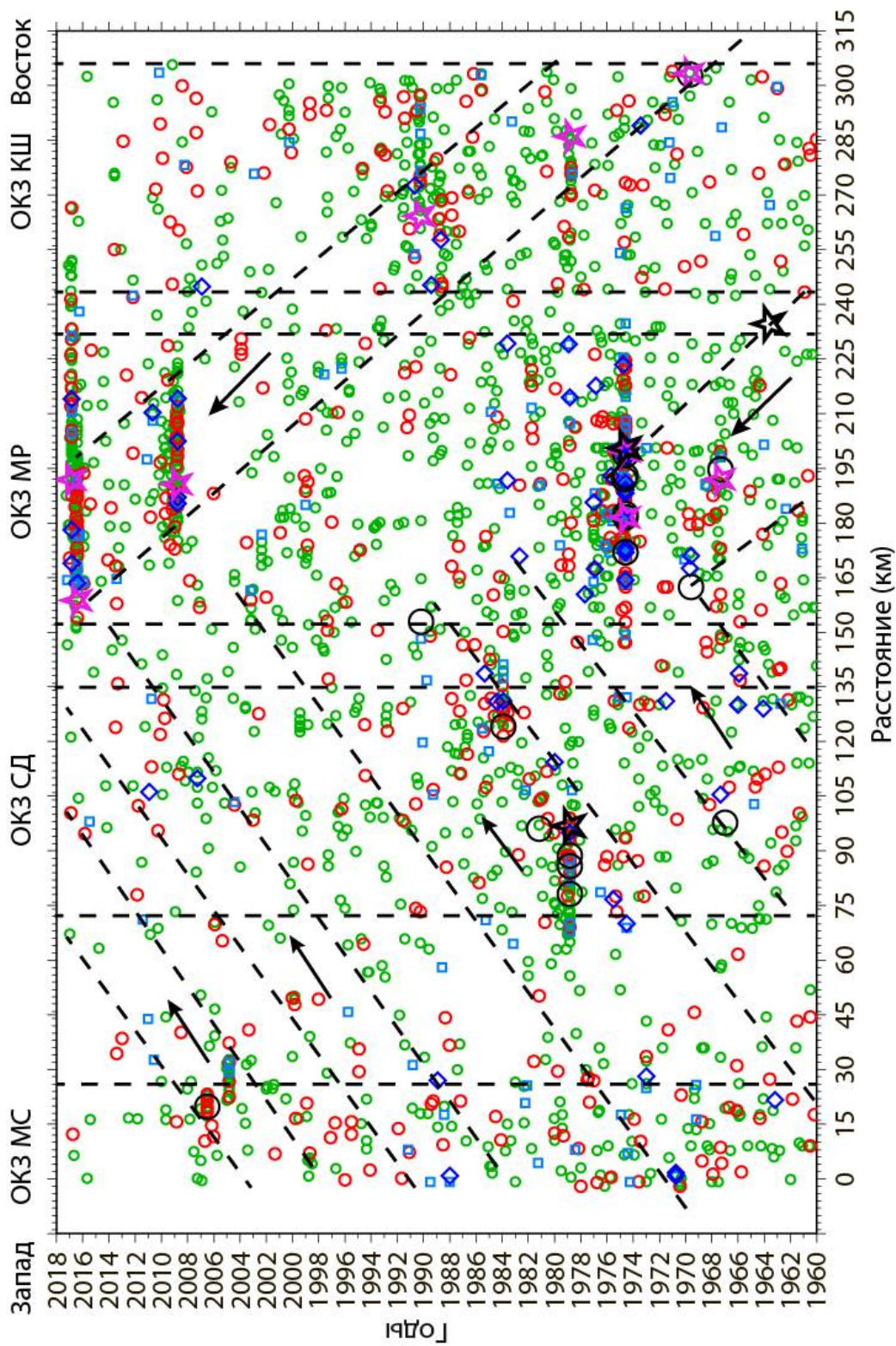


Рис.11. Распределение землетрясений с $K \geq 7.6$ во времени вдоль активных структур Заалая на сочленении Памира и Тянь-Шаня за 1960-2017 гг. Наклонными пунктирными линиями показаны вероятные векторы сейсмической активизации (направленные (стрелки) с востока на запад и с запада на восток), а вертикальными пунктирами - вероятные области концентрации значительных землетрясений. Условные обозначения землетрясений приведены на рис.2. Области концентрации землетрясений (ОКЗ): МС -Мукуе, СД- Саукдара, МР-Маркансу, КШ-Кушуюган.

На рис.12 приведён график повторяемости землетрясений в пределах активных структур Заалая на сочленении Тянь-Шаня и Памира за 1960-2017 гг. Представительным энергетическим классом является $K=9.0$. Повторяемость землетрясений по закону Гутенберга–Рихтера выражается формулой:

$$\lg N = -0.4662 \lg E + 6.1034, \quad R^2 = 0.99, \quad (1)$$

где $\lg N$ – средняя годовая частота, $\lg E = K$ – энергетический класс (Дж), R^2 – достоверность аппроксимации. Среднее время повторения землетрясений выражается формулой:

$$\lg T = 0.4662 \lg E - 6.1034, \quad R^2 = 0.99, \quad (2)$$

где $\lg T$ – среднее время повторения землетрясения (год), $\lg E = K$ – энергетический класс, R^2 – достоверность аппроксимации.

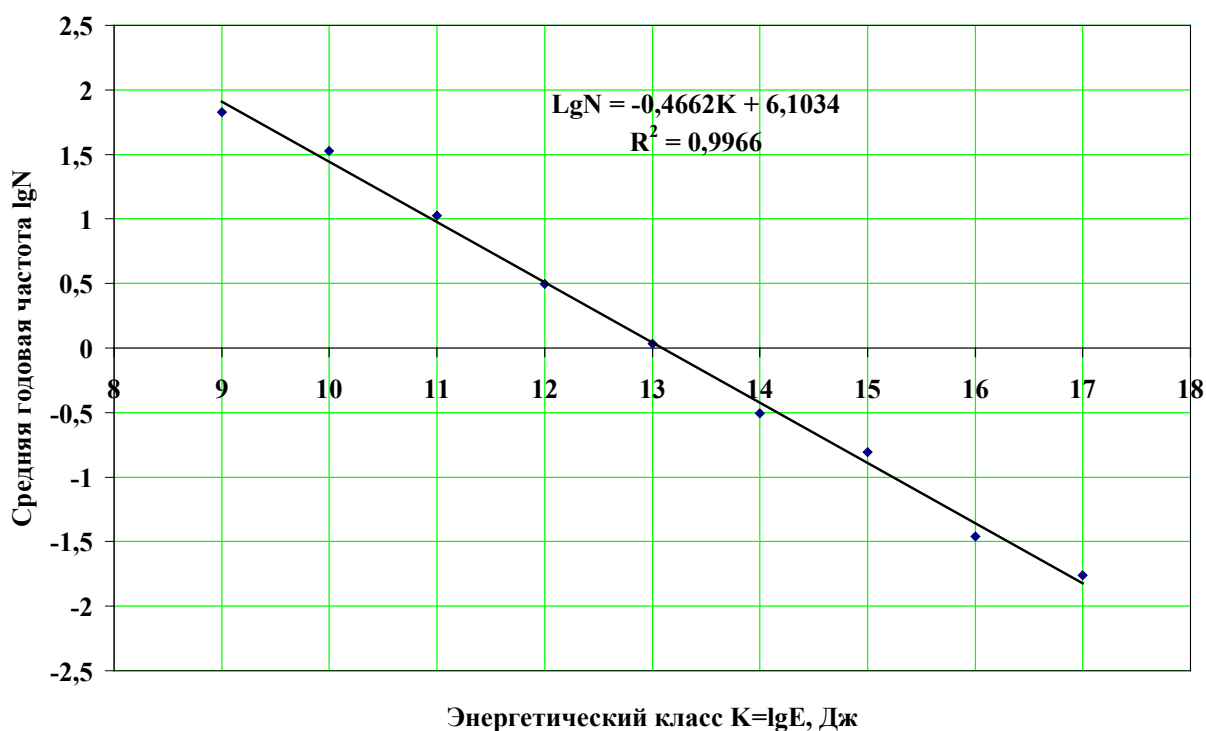


Рис.12. График повторяемости землетрясений в пределах активных структур Заалая на сочленении Тянь-Шаня и Памира за 1960-2017 гг.

Вероятное среднее время повторения землетрясений с $K=11.6-17.5$ в пределах активных структур Заалая приведено в табл.1.

Таблица 1.

№	Энергетический класс $K=\lg E$, Дж	Магнитуда	Среднее время повторения, год (лет)
1	11.6-12.5	4.5-5.1	0.31
2	12.6-13.5	5.2-5.8	0.91
3	13.6-14.5	5.9-6.4	2.65
4	14.6-15.5	6.5-7.1	7.76
5	15.6-16.5	7.2-7.8	22.69
6	16.5-17.5	7.9-8.5	66.37

В последовательности проявления землетрясений с $K \geq 9.0$ за период 1960-2017 гг. выделяются периоды сейсмической активизации, затишья и сейсмические циклы (рис.13). По пикам циклов, например, третьего порядка выделяются циклы второго порядка, а по пикам циклов второго порядка – циклы первого порядка. Как видно из рис.13 после землетрясения с $K=15.9$ (август 1963 г.) сейсмическая активизация сейсмического цикла первого порядка достигла своего пика в августе 1974 г., тогда и произошло землетрясение Маркансу, $K=16.6$. В дальнейшем наблюдался спад сейсмической активизации. В ноябре 1978 г. проявилось землетрясение Дараут-Курган, $K=16.2$. Затем наступил период сейсмического затишья. В 1990 г. произошло землетрясение с $K=15$, а 5 октября 2008 г. - землетрясение Нура, $K=14.6$. В октябре 2016 г. наступил период сейсмической активизации и проявилось землетрясение с $K=15.4$. За период с августа 1974 г. по октябрь 2016 г. проявились 13 циклов третьего порядка с продолжительностью 1-7 лет (табл.2) и четыре цикла второго порядка с продолжительностью 4-18 лет (табл.3). Притом отмечалась кажущаяся миграция пиков сейсмических циклов в западном и восточном направлениях по областям концентрации землетрясений (ОКЗ). Так, пик цикла второго порядка (1974, $K=16.6$) мигрировал от области концентрации землетрясений Маркансу (ОКЗ МР) в западном направлении к ОКЗ СД (Суукдобо), где пик выражался землетрясением Дараут-Курган, $K=16.2$. После отмечалась миграция пика в восточном направлении к ОКЗ КШ (Кушуюган), тогда и проявилось землетрясение в 1990 г. с $K=15.0$. В дальнейшем наблюдалась миграция пика снова в западном направлении к ОКЗ МР и проявились в 2008 г. землетрясения с $K=14.8$, в 2016 г. - с $K=15.4$. После ожидалась миграция далее в западном направлении к ОКЗ СД или ОКЗ МС. На самом деле в мае 2017 г. отмечалось землетрясение с $K=14.5$ в ОКЗ МС (Муксу) - пик сейсмического цикла третьего порядка.

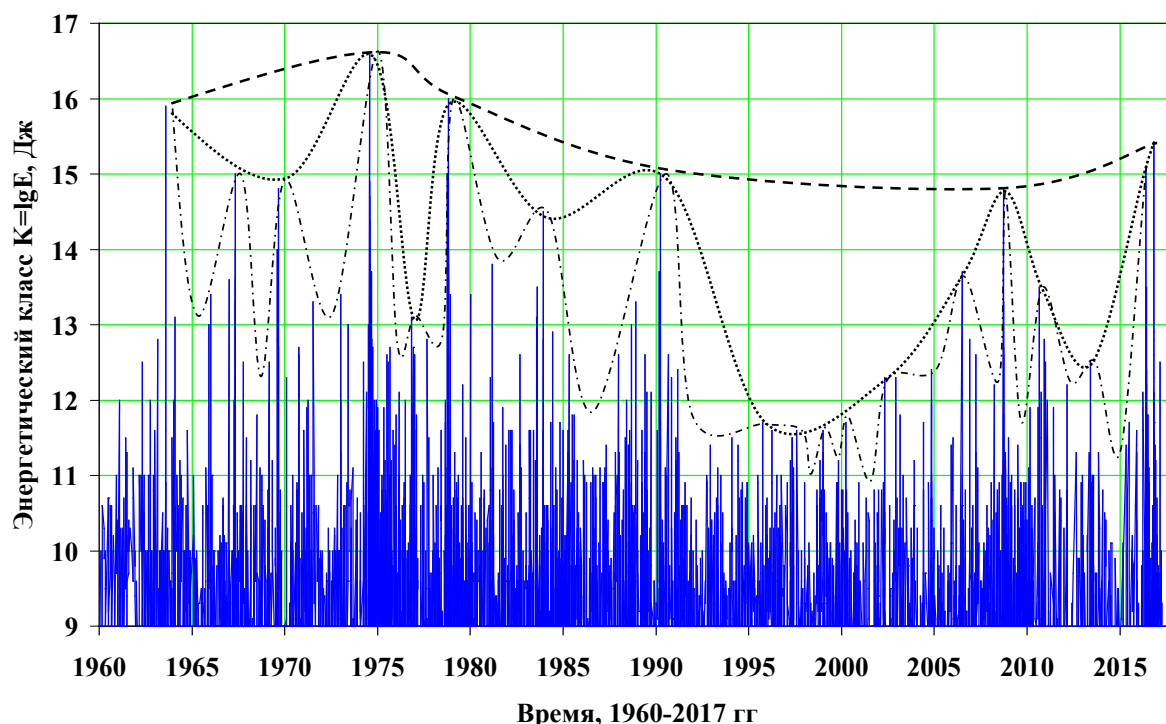


Рис.13. Последовательность проявления землетрясений с $K \geq 9.0$ за период 1960 - 2017 гг. в пределах Заалая на сочленении Тянь-Шаня и Памира. Пунктирной линией обозначен сейсмический цикл первого порядка, точечной линией – сейсмический цикл второго порядка, штрих-пунктиром - сейсмический цикл третьего порядка.

Таблица 2.

Пики сейсмических циклов третьего порядка в последовательности землетрясений активных структур Заалая

№	Время, год.мес.число	Энергетический класс, $K=\lg E$, Дж	Широта φ°	Долгота λ°
1	1974.08.11	16.6	39.23	73.83
2	1976.11.11	13.1	39.50	74.00
3	1978.11.01	16.0	39.40	72.60
4	1983.12.16	14.5	39.38	72.92
5	1990.04.17	15.0	39.45	74.55
6	1995.10.26	11.7	39.27	72.02
7	1999.01.18	11.6	39.48	73.62
8	2000.04.11	11.7	39.5	74.78
9	2002.05.30	12.3	39.52	73.52
10	2006.07.06	13.7	39.17	71.73
11	2008.10.05	14.8	39.62	73.67
12	2010.09.07	13.5	39.63	73.90
13	2013.06.30	12.5	39.08	73.43
14	2016.11.15	15.4	39.22	73.73

Таблица 3. Пики сейсмических циклов второго порядка в последовательности землетрясений активных структур Заалая

№	Время, год.мес.число	Энергетический класс, $K=\lg E$, Дж	Широта φ°	Долгота λ°
1	1974.08.11	16.6	39.23	73.83
2	1978.11.01	16.0	39.4	72.6
3	1990.04.17	15.0	39.45	74.55
4	2008.10.05	14.8	39.62	73.67
5	2016.11.15	15.4	39.22	73.73

Изменение энергетического класса землетрясений сейсмического цикла первого порядка за 1974-2016 гг. нелинейное и выражается эмпирической формулой (рис.14):

$$K(t) = 0.0028t^2 - 0.148t + 16.596, R^2 = 0.998, \quad (3)$$

где $K=\lg E$ Дж, t – время (год), R^2 – достоверность аппроксимации.

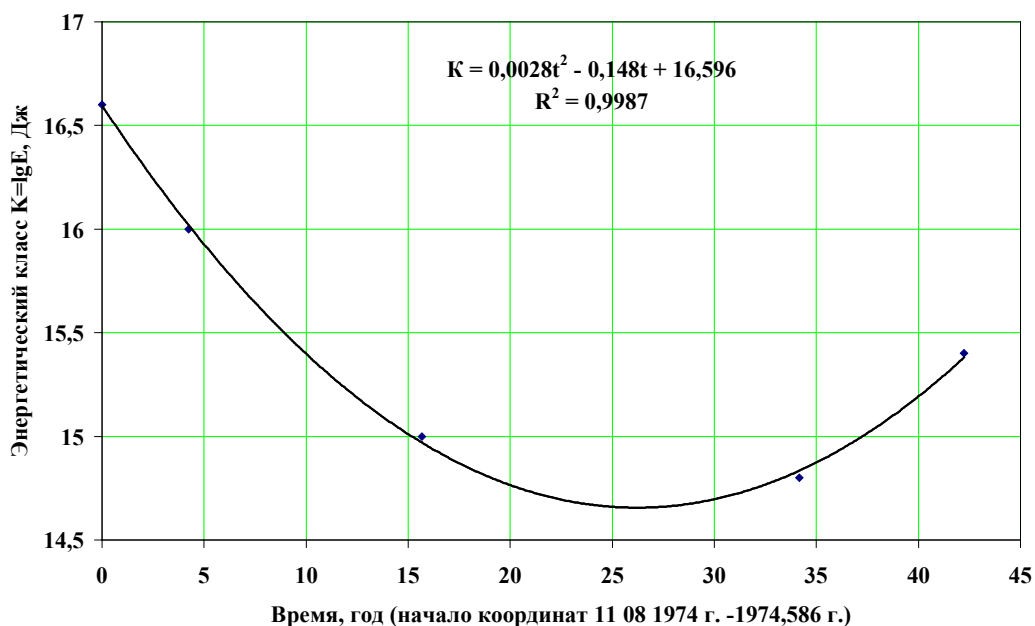


Рис.14. Полиномиальная линия тренда сейсмического цикла первого порядка с 11.08.1974 г. землетрясения Маркансу, $K=16.6$ по 25.11. 2016 г.

Составляющие формулы (3) представляют собой функции сейсмических процессов цикла первого порядка. Графики этих функций приведены на рис.15. Как видно из рис.15, функция $y = 0,0028t^2$ нелинейно растёт, функция $y = -0,148t$ линейно убывает.

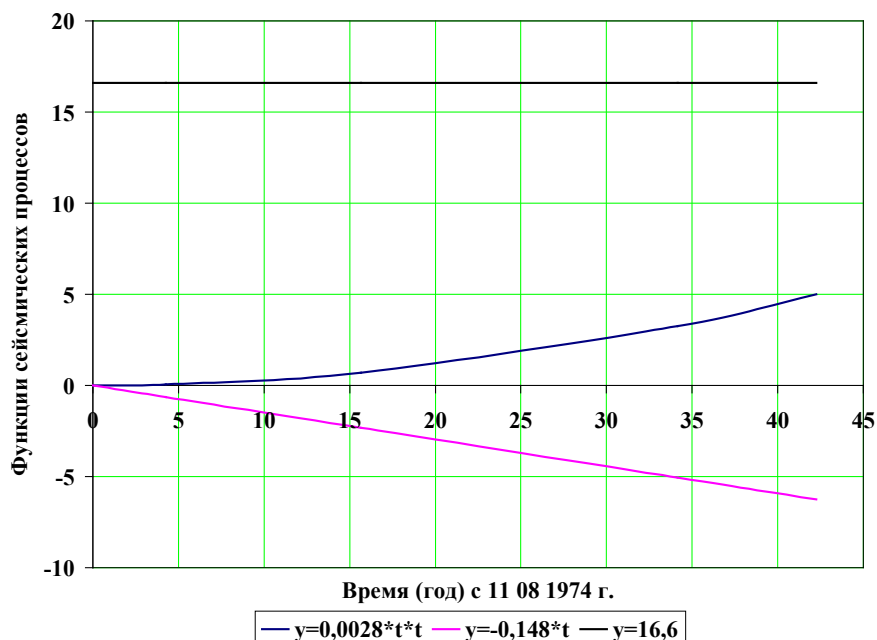


Рис.15. Графики функций сейсмических процессов в сейсмическом цикле первого порядка.

График изменения кумулятивной сейсмической энергии, высвобожденной при землетрясениях с энергетическими классами $K \geq 8.0$ в пределах активных структур Заалая на сочленении Тянь-Шаня и Памира за период 1960-2017 гг. приведён на рис.16.

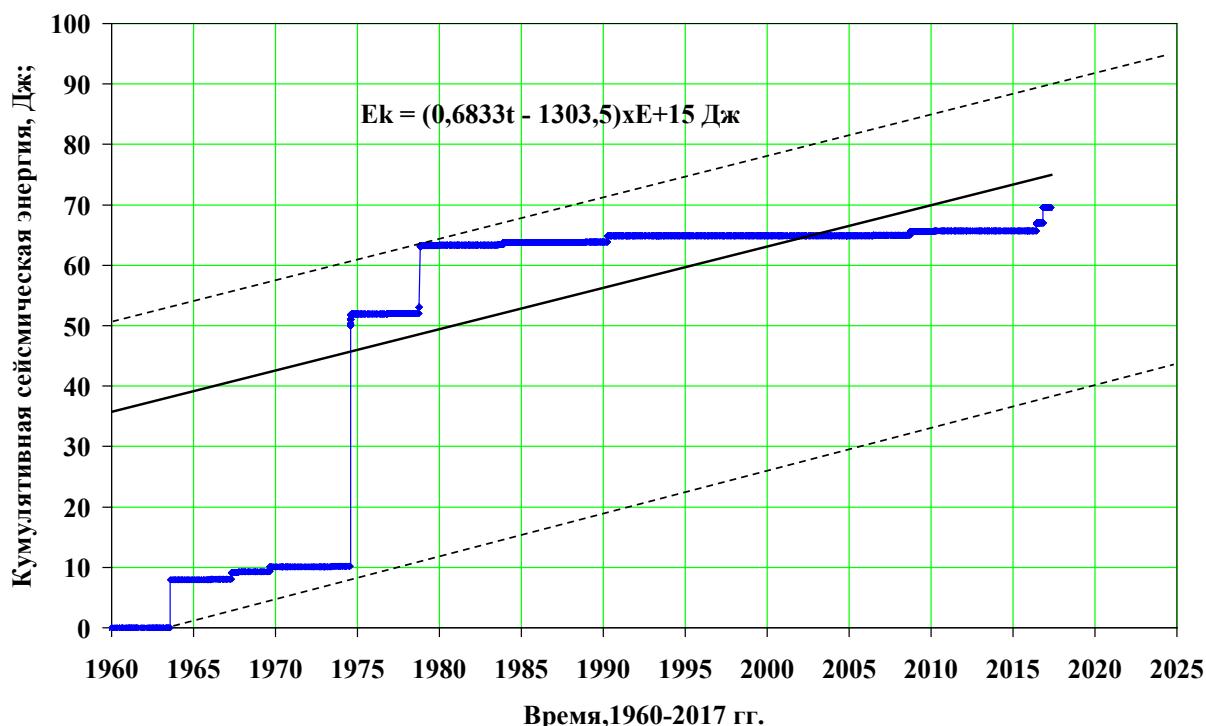


Рис.16. Кумулятивная сейсмическая энергия, высвобожденная при землетрясениях с энергетическими классами $K \geq 8.0$ в пределах активных структур Заалая на сочленении Тянь-Шаня (Южного Тянь-Шаня) и Памира за 1960-2017 гг. Сплошной линией обозначен линейный тренд, пунктирными линиями — нижний и верхний пределы флуктуации E_k .

График неровный, ступенчатый, отражает циклы сейсмических процессов. Линейный тренд графика выражается эмпирической формулой:

$$E_k = (0.6833t - 1303.5) \times 10^{15}, \quad (4)$$

где E_k — кумулятивная сейсмическая энергия (Дж), t — время (год), коэффициент 0.6833×10^{15} имеет размерность Дж/год и представляет собой скорость высвобождения энергии. Разница энергии нижней и верхней границы флуктуаций составляет около 5.3×10^{16} Дж и представляет собой возможную максимальную сейсмическую энергию одного или двух землетрясений на сочленении Тянь-Шаня (Южного Тянь-Шаня) и Памира.

Заключение

1. В распределении землетрясений (за 1960-2017 гг.) в пределах активных структур Заалайского поднятия на сочленении Памира и Тянь-Шаня выделяются области концентрации землетрясений (ОКЗ с запада на восток): Муксу (МС), Саукдара (СД), Маркансу (МР), Кушуюган (КШ), которые выражают процессы динамической сегментации и динамической секторизации активных структур. В распределении землетрясений во времени вдоль активных структур отмечаются векторы сейсмической активизации, направленные с востока на запад и с запада на восток, проявляющиеся последовательно по рядам ОКЗ. Кажущаяся скорость сейсмической активизации вектора с востока на запад составляет около 3 км/год, а с запада на восток — около 4 км/год.
2. В последовательности проявления землетрясений за период 1960-2017 гг. поэтапно выделялась иерархия циклов третьего, второго, первого порядков. Землетрясение Маркансу, $K=16.6$, $M=7.3$, 1974 г. являлся пиком сейсмического цикла первого

порядка. Продолжительность цикла третьего порядка составляла 1-7 лет, второго порядка - 4-18 лет. Изменение энергетического класса землетрясений сейсмического цикла первого порядка за 1974-2016 гг. нелинейное и выражается эмпирической формулой:

$$K(t) = 0.0028t^2 - 0.148t + 16.596, R^2 = 0.998,$$

где $K = \lg E$ Дж, t – время (год), R^2 – достоверность аппроксимации. Составляющие этой формулы представляют собой функции сейсмических процессов.

3. График изменения кумулятивной сейсмической энергии, высвобожденной при землетрясениях с энергетическими классами $K \geq 8.0$ в пределах активных структур на сочленении Тянь-Шаня и Памира за период 1960-2017 гг. неровный, ступенчатый (выражает сейсмические циклы), имеет линейный тренд:

$$E_k = (0.6833t - 1303.5) \times 10^{15}, \text{ Дж},$$

где E_k – кумулятивная сейсмическая энергия (Дж), t – время (сутки), коэффициент 0.6833×10^{15} имеет размерность Дж/год, т.е. представляет собой скорость высвобождения сейсмической энергии.

4. Повторяемость землетрясений по закону Гутенберга–Рихтера выражается формулой:

$$\lg N = -0.4662 \lg E + 6.1034. \quad R^2 = 0.99,$$

где $\lg N$ – средняя годовая частота, $\lg E = K$ – энергетический класс (Дж), коэффициент 0.4662 является коэффициентом (наклоном) графика повторяемости, R^2 – достоверность аппроксимации. Отмечено, что повторяемость землетрясений по закону Гутенберга–Рихтера предопределяется иерархией сейсмических циклов. Среднее время повторения землетрясений выражается формулой:

$$\lg T = 0.4662 \lg E - 6.1034. \quad R^2 = 0.99,$$

где $\lg T$ – среднее время повторения землетрясения (год), $\lg E = K$ – энергетический класс, R^2 – достоверность аппроксимации.

Литература

1. Streckler M.R., Frisch W., Hamburger M.W., Ratschbacher L., Semiletkin S., Zamoruev A., Struchio N. Quaternary deformation in the Eastern Pamir, Tadjikistan and Kyrgyzstan/ *Tectonics*, 1995, 1061-1079.
2. Burtman V.S., Molnar P. Geological and geophysical evidence for deep subduction of continental crust beneath the Pamir. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 1993. 281. 76 p.
3. Coutand I., Streckler M.R., Arrowsmith J.R., Hilley G., Thiede R.C., Korjenkov A., Omuraliev M. Late Cenozoic tectonic development of the intramontane Alai Valley (Pamir- Tian Shan region, Central Asia). *Tectonics*, 2002. vol.21, No.6, 1053
4. Omuraliev M., Omuralieva A. Late Cenozoic tectonics of the Tien Shan. *Kyrgyzstan, Central Asia. Bishkek. 2004. 166p.*
5. Бутовская Е.М., Суров В.П., Ергашев Т.Е. и др. Глубинные строения Памира и Южного Тянь-Шаня по данным сейсмического зондирования // *Земная кора и верхняя мантия Памира, Гималаи и Южного Тянь-Шаня. М.: Наука, 1984, с. 50-65.*
6. Уломов В.И. Динамика земной коры Средней Азии и прогноз землетрясений, Ташкент: ФАН, 974. 2018 с.
7. Sippl C., B. Schurr, X. Yuan, J. Mechie, F.M. Schneider, M. Gadoev, et al. Geometry of the Pamir-Hindu Kush intermediate-depth earthquake zone from local seismic data. // *J Geophys Res*, 118 (2013), pp. 1438-1457, 10.1002/jgrb.50128 [10.1002/jgrb.50128](https://doi.org/10.1002/jgrb.50128)

8. A. Zubovich, X. Wang, Y. Scherba, G. Schelochkov, R. Reilinger, C. Reigber, et al. GPS velocity field for the Tien Shan and surrounding regions. //Tectonics, 29 (2010), p. TC6014, [10.1029/2010TC002772](https://doi.org/10.1029/2010TC002772).
9. A. Ischuk, R. Bendick, A. Rybin, P. Molnar, S.F. Khan, S. Kuzikov, et al. Kinematics of the Pamir and Hindu Kush regions from GPS geodesy. //J Geophys Res, 118 (2013), pp. 2408-2416, [10.1002/jgrb.50185](https://doi.org/10.1002/jgrb.50185).
10. Никонов А.А., Ваков А.В., Веселов И.А. Сейсмотектоника и землетрясения зоны сближения Памира и Тянь-Шаня. М.: Наука, 1983, 240 с.

Рецензент: д-р г.-мин. наук, профессор К. Е. Абдрахматов